

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.20.002

多级AO工艺在某高排放标准污水厂的优化探讨

周合喜, 张金松, 张庆珮

(深圳市水务<集团>有限公司 深圳城市污水处理与再生利用工程实验室,
广东 深圳 518031)

摘要: 深圳市某污水处理厂采用多级AO工艺,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准。随着城市水环境治理的深入推进,该污水厂出水水质标准需提高到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)准Ⅳ类标准。近一年的运行数据表明,该厂出水COD、BOD₅和SS稳定达到地表水准Ⅳ类标准,出水NH₄⁺-N、TN和TP基本满足标准要求,达标保障率在80%以上。基于实际运行效果,结合现状构筑物提标改造潜力,提出通过优化运行管理以满足高排放标准要求。采取的优化措施主要包括精确曝气控制系统氨氮设定目标值为0.5~1 mg/L、精确进水配比为1:1:1或5:3:2、三级内回流比为50%、化学除磷药剂投加量为35~40 mg/L及生物除磷污泥龄为19.3 d。提出的措施已纳入该污水厂提标改造工程方案,用于指导下一步提标改造工作。

关键词: 污水处理厂; 多级AO工艺; 高排放标准; 优化运行管理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)20-0008-06

Discussion on Optimization of Multi-stage AO Process in a Wastewater Treatment Plant under High Discharge Standards

ZHOU He-xi, ZHANG Jin-song, ZHANG Qing-pei

(Shenzhen Engineering Research Laboratory for Urban Sewage Treatment and Reclamation,
Shenzhen Water Group Co. Ltd., Shenzhen 518031, China)

Abstract: A multi-stage AO process was adopted in a wastewater treatment plant in Shenzhen while the effluent quality met the first level A criteria of *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002). With the further development of urban water environment management, the effluent discharge standards require further improvement to meet the quasi-class IV criteria of *Environmental Quality Standard for Surface Water* (GB 3838-2002). The operation data in the past year indicated that the effluent concentrations of COD, BOD₅ and SS could meet the quasi-class IV criteria for surface water. The NH₄⁺-N, TN and TP concentrations of the effluent could basically meet the standards, and the standard compliance rates were above 80%. This paper proposed to optimize the operation management to meet the requirements of high discharge standards based on the actual operation effect and combined with the potential of the existing facilities. Specific optimized measures were as follows: the target values of ammonia in the precise aeration control system were set at 0.5-1 mg/L; the influent distribution ratio was 1:1:1/5:3:2 by precise measurement; the internal reflux ratio of the third

基金项目: 深圳市科技计划项目(KJYY20171012140149523)

通信作者: 周合喜 E-mail: hexi725@163.com

stage was 50%; the dosages of chemical phosphorous removal were 35–40 mg/L; the sludge retention time of biological phosphorous removal was 19.3 d. The measures have been taken into project scheme for upgrading the wastewater treatment plant, which will guide the next upgrading work.

Key words: wastewater treatment plant; multi-stage AO process; high discharge standards; operation and management optimization

深圳市某污水处理厂是市政府近年来规划建设的首座半地下式大型市政污水处理厂,服务面积 62.43 km²,主要处理福田区和南山区部分区域的城镇生活污水。该厂一期工程设计规模 40×10⁴ m³/d,占地 14.58 hm²,采用多级 AO 工艺,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。随着珠江流域水环境综合治理的不断推进,深圳特区内城市水系和近海海域水环境质量要求显著提升。根据深圳市治水提质行动方案要求,现有污水处理厂出水水质需提高到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类标准(TN 除外)。为此,该污水处理厂需进行水质提升以满足新的排放要求。目前主要通过优化运行管理和工程措施(如深度处理)两种方式对污水厂进行提标改造^[1],但是地下式污水处理厂受柱网及布局的限制,建成后再通过工程措施进行提标改造的难度较大。通过对该污水处理厂历史数据统计分析,结合现状构筑物的提标改造潜力,提出通过优化运行管理以满足地表水Ⅳ类标准要求,以期为同类污水处理厂建设和提标改造提供参考。

1 设计水质及工艺流程

该污水处理厂一期工程设计规模 40×10⁴ m³/d,设计进水水质按 90% 保证率确定,出水水质执行一级 A 标准,升级改造后出水水质需稳定达到地表水Ⅳ类标准,具体指标见表 1。

表 1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

项 目	mg·L ⁻¹					
	COD	BOD ₅	SS	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP
设计进水	540	205	282	50	63.5	6.5
一级 A 出水	50	10	10	5	15	0.5
地表水Ⅳ类出水	30	6	6	1.5	10	0.3

污水处理采用多级 AO 工艺,具体流程见图 1。其中,多级 AO 生物池共分为三级七段,如图 2 所示。污水分段进入生物池厌氧段和两个缺氧段,形成多

级 AO 串联形式。生物池各级均设置内回流,可通过各级内回流强化反硝化效果。

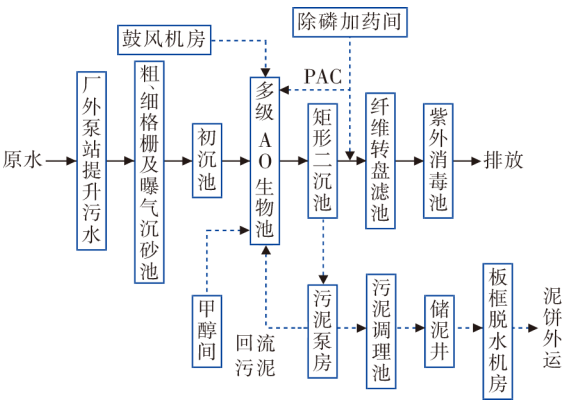


图 1 污水处理工艺流程

Fig.1 Process flow chart of wastewater treatment

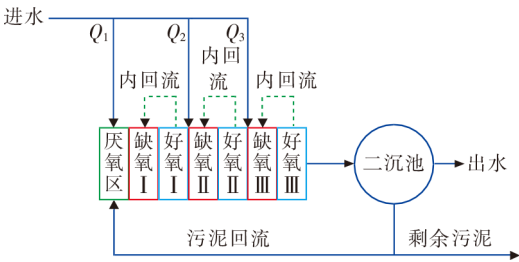


图 2 多级 AO 工艺示意

Fig.2 Schematic diagram of multi-stage AO process

多级 AO 工艺强化了反硝化脱氮作用,同时兼顾传统生物除磷作用,实现了碳源的高效利用。这是因为好氧段产生的硝态氮不仅可以通过内回流进入缺氧段进行反硝化脱氮,也可以进入后续缺氧段反硝化脱氮,从而实现更好的脱氮效果。此外,前置厌氧区为聚磷菌的生长繁殖提供了有利条件,从而在一定程度上实现了生物除磷作用。

2 生化池设计参数

多级 AO 生化单元主要设计参数如下:污泥龄为 19.3 d,污泥负荷为 0.06 kgBOD₅/(kgMLSS·d),容积负荷为 0.252 kgBOD₅/(m³·d),平均污泥浓度为 4 200 mg/L,总水力停留时间为 14.8 h,其中厌氧区、缺氧 I 段、好氧 I 段、缺氧 II 段、好氧 II 段、缺氧 III

段、好氧Ⅲ段水力停留时间分别为1、1.8、1.8、2.3、2.3、2.8、2.8 h,进水配比 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 为0~50%(典型值为33.3%),污泥回流比为50%~100%,混合液回流比为0~50%,好氧段DO控制在2 mg/L左右。

生化池共分为4座8组,每座(两组)按 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 处理能力设计,单座生化池尺寸长为122.9 m,宽为75.7 m,高为9.25 m,设计有效水深7.5 m,单座生化池有效容积为 $61\,666 \text{ m}^3$ 。每座生化池共设32套潜水搅拌机,布置于厌氧和缺氧段,混合液回流泵16套,设于每级好氧段末端。

3 运行效果及提标改造分析

3.1 运行效果

该污水处理厂一期工程自2016年10月正式运行以来,处理水量逐年上升,2018年日均处理水量达 $36 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,现状处理污水量已接近满负荷。2018年7月—2019年6月该厂全年进、出水水质及达标率如表2所示。

表2 实际进、出水水质及达标率

Tab.2 Actual influent and effluent quality and standard compliance rate

项 目		COD	BOD ₅	SS	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP
进水/ (mg· L ⁻¹)	最大值	579.0	304	484	35.15	40.74	5.74
	最小值	114.0	50.0	38	7.48	10.56	1.01
	平均值	249.9	128.2	161.7	22.54	28.85	3.07
出水/ (mg· L ⁻¹)	最大值	29.6	3.4	8	1.78	13.17	0.40
	最小值	7.2	2.0	5	0.06	2.82	0.04
	平均值	13.6	2.1	5	0.60	8.56	0.22
达标 率/%	一级A	100	100	100	100	100	100
	地表水准Ⅳ类	100	100	100	99.5	83.2	81.9

由表2可以看出,进水COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TN、TP和SS平均浓度分别为249.9、128.2、22.54、28.85、3.07和161.7 mg/L,出水平均浓度分别为13.6、2.1、0.60、8.56、0.22和5 mg/L,出水水质优于一级A标准,达标率为100%。这表明该污水处理厂运行状况良好,符合设计预期。

3.2 提标改造潜力

根据深圳市新一轮水质提升方案,现状执行一级A标准的城镇污水处理厂需逐步提高到地表水准Ⅳ类标准,因此该污水处理厂面临提标改造的需要。该厂位于深圳市核心区域,采用半地下式结构,受柱网及布局的限制,难以再通过工程化措施实施提标改造,因此优先选择优化运行管理方式进行原位提标改造。

分析近一年运行数据,对比地表水准Ⅳ类标准限值,发现出水水质指标平均值均满足地表水准Ⅳ类标准。其中,出水COD、BOD₅和SS达标保障率均为100%,意味着现状运行下COD、BOD₅和SS指标已稳定达到高排放标准,但是NH₄⁺-N、TN和TP部分时段超过新标准限值。出水NH₄⁺-N的达标保障率为99.5%,因此易于通过优化运行满足新标准要求。出水TN和TP的达标保障率分别为83.2%和81.9%,经出水水质达标难度等级评估,该等级处于“一般”水平,意味着可优先采用优化运行管理,当优化运行后无法达标时,再采取工程化措施。综上,本项目提标改造关键指标为NH₄⁺-N、TN和TP。

实施提标改造即提高关键指标的达标保障率,对现状出水NH₄⁺-N、TN和TP的统计分析见图3。

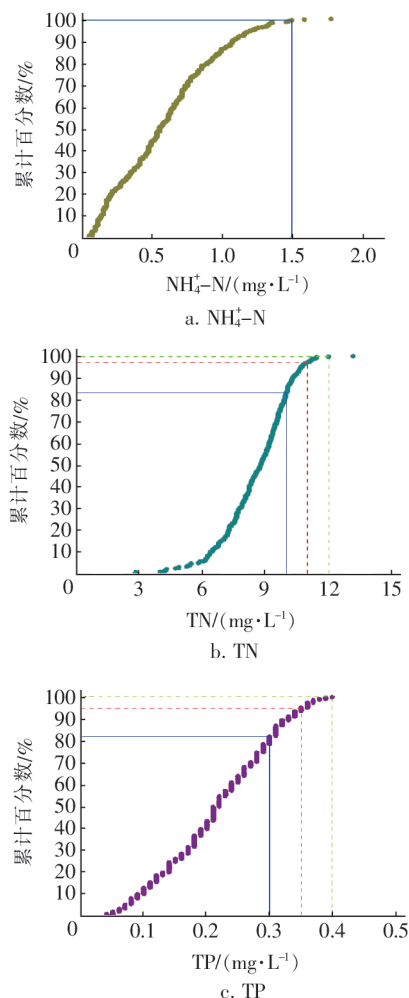


图3 现状出水NH₄⁺-N、TN和TP累计频率分布

Fig.3 Cumulative frequency distribution of NH₄⁺-N, TN and TP in effluent

由图3可看出,出水NH₄⁺-N≤1.5 mg/L的比例

为99.5%,全年轻有2 d超过新标准限值,且最大值仅为1.78 mg/L,意味着现状出水 NH_4^+-N 基本达到新标准要求,仅需要加强运行管理即可稳定达标。现状出水 $\text{TN} \leq 10 \text{ mg/L}$ 的比例为83.2%,意味着出水 TN 仅有16.8%达不到新标准要求,且出水 $\text{TN} \leq 11 \text{ mg/L}$ 和 12 mg/L 的比例分别为97.3%和99.7%,也就是说出水 TN 浓度降低1~2 mg/L即可稳定达标。现状出水 TP 不高于0.3、0.35和0.4 mg/L的比例分别为81.9%、95.1%和100%,意味着出水 TP 浓度降低0.1 mg/L即可稳定达标。

该污水处理厂已稳定运行3年,设计进水水质与实际进水水质对比见表3。

表3 设计进水水质与实际进水水质对比

Tab.3 Comparison of design influent and actual influent quality $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	COD	BOD_5	SS	NH_4^+-N	TN	TP
设计进水	540	205	282	50	63.5	6.5
90%保证率进水	326	172	236	27.21	34.01	3.77

由表3可以看出,实际进水水质明显低于设计进水水质。其中,进水 COD 、 NH_4^+-N 、 TN 和 TP 浓度不足设计值的60%,进水 BOD_5 和 SS 浓度仅为设计值的80%,意味着现状构筑物负荷较低,处理能力存在冗余,工艺潜能有待进一步挖掘。

现状生化单元主要运行参数:平均水力停留时间为15.7 h,平均污泥浓度为6 500 mg/L,平均泥龄为29.9 d,污泥负荷为 $0.024 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$,总氮负荷率为 $0.01 \text{ kgTN}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$,污泥回流比为85%,混合液仅在末段回流且回流比为25%,好氧段 DO 控制在 $1.8 \sim 2.5 \text{ mg/L}$ 。特别是受污泥处理设施改造产能限制,2019年2月前生化系统污泥浓度明显较高,自新污泥处理设施投产后,生化池污泥浓度、污泥龄、排泥量均趋于设计值。为保证出水 TP 稳定达标,该污水处理厂除利用生物除磷作用外,还采取辅助化学除磷方式,设计除磷药剂 PAC 投加量为 65.8 mg/L (质量分数为10%,下同),实际投加量为 30 mg/L 。

通过复核生化池处理能力发现,污泥负荷和总氮负荷分别为设计值的40%和30%,即使扣除排泥不畅的因素,现状生化系统负荷仍较低,且工艺运行参数具有较大的优化空间。对比关键指标 NH_4^+-N 、 TN 和 TP 的新增削减量,经计算,在目前进水水质状况下,现状处理构筑物能够保证出水达到地表水准

Ⅳ类标准。因此,结合该污水处理厂运行现状,采用优化运行管理方式进行提标改造。

3.3 关键指标因素分析

该污水处理厂提标改造关键指标为 NH_4^+-N 、 TN 和 TP ,深入分析其达标影响因素以便梳理优化运行措施。其中,出水 NH_4^+-N 达标主要受温度、 HRT 、 DO 、污泥浓度等因素影响^[1],对比污水处理厂运行现状,筛选出重点影响因素为 DO 。目前,污水处理厂多数采用精确曝气控制系统,以降低曝气量、节省成本。在满足一级A标准前提下,污水处理厂运营一般采用低 DO 模式。因此,可通过优化精确曝气控制系统,提高出水 NH_4^+-N 的达标保障率。出水 TN 达标主要受进水 BOD_5/TN 、进水碳源分配、污泥龄、混合液回流比等因素影响。近一年的进水数据显示, BOD_5/TN 平均值为4.44,属于碳源较充足的污水,可满足系统脱氮需要。经与实际运行参数比较,筛选出 TN 达标重点影响因素为进水碳源分配和混合液回流比。在一级A及以上排放标准下,出水 TP 达标受化学除磷和生物除磷的综合影响。其中,化学除磷主要受药剂种类、投加点、投加量等因素影响;生物除磷主要受进水 BOD_5/TP 、污泥龄、温度、 HRT 等因素影响。对比污水处理厂现状,识别出 TP 达标重点影响因素为药剂投加量和污泥龄。

4 优化运行措施

4.1 多模式精确曝气控制系统优化

该污水处理厂生化池采用多模式精确曝气控制系统,包括时钟模式、 DO 模式及氨氮模式,建立基于三种自动控制模式互为补充的精确曝气系统,特别是精确曝气氨氮模式,可将生化池出水氨氮浓度稳定控制在设定的范围内,保证出水氨氮稳定达标,降低出水水质超标风险。目前,该污水处理厂精确曝气氨氮的设定目标值为 $1 \sim 2 \text{ mg/L}$ 。近一年的运行效果表明,出水氨氮最大值不超过设定目标值,能够保证出水氨氮浓度稳定达到一级A标准。事实上,出水氨氮浓度明显低于一级A标准限值。因此,基于精确曝气氨氮模式的控制系统能够将出水氨氮浓度控制在设定的范围。针对该污水处理厂出水氨氮浓度存在超过新标准限值的风险,可将氨氮设定目标值降低到 $0.5 \sim 1 \text{ mg/L}$,以保证出水水质稳定达到地表水准Ⅳ类标准。另外,氨氮在线仪

表在低量程范围(0~1 mg/L)内测量精度和准确度较低,测量值作为反馈调节的关键输入参数,直接关系到污水处理厂的运行稳定性和达标保证率。因此,运行管理上需强化在线仪表的维护和校核,保证测量值的准确性和稳定性。综上,基于多模式精确曝气控制系统的优化,合理设定氨氮目标值,强化在线仪表维护,能够保证出水氨氮浓度稳定达到高排放标准要求。

4.2 进水分配精确化

多级AO工艺通过多点配水实现碳源的合理分配和有效利用。理论上,若生化池各段进水配比相同,污泥回流比为85%,最后段内回流比为25%,根据相关计算公式^[2],多级AO工艺脱氮效率可达84.1%。然而,近一年的运行数据显示,系统平均TN去除率仅为70.1%,与理论脱氮率仍有不小差距。分析原因,可能是污水处理厂进水配比偏离最优区间,未能充分利用进水碳源,发挥多级AO工艺强化脱氮的优势。事实上,该污水处理厂多点配水采用配水渠+可调堰方式,缺少流量计量装置,实际运行中仅凭感觉调节,无法精确获得各级进水量,因此难以科学进行进水量的高效分配^[3]。在高排放标准目标要求下,污水处理厂进水量必须实现精确控制,以实现进水碳源的有效分配,保证多级AO系统获得稳定高效的脱氮效果。因此在配水渠中加装明渠流量计及电动堰门控制,以实现各级配水点的精确测量和控制,远程连接中控室,实时监控和调整各级进水配比,摸索和优化最佳碳源分配方式,提高污水处理厂的脱氮除磷效率。实际运行中,多级AO工艺各级进水量常采取逐级增大、逐级减少或者均匀分配的流量分配方式,以充分利用进水碳源,强化反硝化脱氮效果。根据模拟小试结果,进水配比为1:1:1或5:3:2时,出水TN浓度可稳定达到地表水Ⅳ类标准。因此,精确计量和分配进水量,优化配比,能够提高系统的脱氮效果,保证出水TN浓度稳定达标。

4.3 内回流优化

理论上,多级AO工艺除最后一级外无需设置内回流,前提是各级好氧段和缺氧段硝化反硝化反应充分,各级进水中均有足够的碳源满足反硝化需求。事实上,进水水质、水量的波动以及活性污泥性状变化难以实时满足理论前提。为保证多级AO工艺的生物脱氮效果,工程上各级AO段通常均设

计内回流,通过强化硝化液回流来提高系统TN去除效果。该污水处理厂设计三级内回流,回流比为0~50%,其中一级、二级内回流设计为常闭模式,视运行水质状态开启。在一级A排放标准下,现状运行仅在末段进行内回流,回流比为25%。为保证出水TN浓度稳定达到地表水Ⅳ类标准,可优化提高末端内回流比(例如提高到50%),或者在一级、二级AO段开启内回流。工程案例^[2-3]表明,通过实施内回流强化反硝化效果以保证出水TN达标的措施是完全可行的。本项目中,平均出水TN浓度为8.56 mg/L,出水TN达标保障率为83.2%。根据现状出水水质与高排放标准要求,出水TN浓度需降低1~2 mg/L。研究^[4-5]表明,内回流比调整在一定程度上可提高TN去除率,结合该污水处理厂运行现状,调整内回流比仍有较大空间。多级AO工艺中内回流强化反硝化效果从末端向前端依次降低,因此内回流优化措施依次是三级内回流(50%)、二级内回流(0~50%)、一级内回流(0~50%)。根据模拟小试结果,三级内回流比为50%时能够保证出水TN稳定达标。综上,通过实施内回流优化,同时结合进水碳源有效分配,能够显著降低出水TN超标风险,实现达标排放。

4.4 强化化学/生物除磷能力

生物除磷很难使出水TP<1.0 mg/L,在一级A标准甚至地表水Ⅳ类标准要求下,必须辅助化学除磷。该污水处理厂通过在生化池末端投加30 mg/L的PAC保证出水TP稳定达到一级A标准,平均出水TP为0.22 mg/L。为满足地表水Ⅳ类标准,出水TP需降低0.1 mg/L。根据设计规范计算,需增加2.5 mg/L的PAC,考虑出水达标的系数,增加5~10 mg/L的PAC能够满足高排放标准要求。因此,将现有除磷药剂PAC的投加量调整到35~40 mg/L,可保证出水TP浓度稳定达到地表水Ⅳ类标准。生物除磷系统主要通过及时排出剩余污泥来实现除磷,因此对污泥龄的有效控制是发挥生物除磷能力的关键。本项目生化池设计污泥龄为19.3 d,然而由于污泥处理设施改造产能限制,导致该污水处理厂生化池排泥不畅,统计期内实际平均污泥龄达29.9 d,明显高于设计值。生化池污泥龄过长,一方面会使污泥活性降低,另一方面污泥趋于老化,导致系统除磷效率下降。污水处理厂出水TP分布数据显示,出水TP>0.3 mg/L时段系统基本处于

排泥受阻期。因此,合理控制污泥龄,保证充分的剩余污泥排出,能够有效发挥生物除磷功能,减少化学除磷药剂的投加。综上,通过强化系统化学除磷(增加PAC投加量)和充分发挥生物除磷能力(控制污泥龄),能够保证出水TP浓度稳定达到高排放标准要求。

5 结语

深圳市某污水处理厂采用多级AO工艺,出水水质执行一级A标准。鉴于高排放标准水质提升要求,通过分析历史运行数据,复核现状构筑物的处理能力,提出基于优化运行管理来满足地表水准Ⅳ类标准。运行数据显示,现状出水水质均优于设计标准,部分指标达到高排放标准要求。提标改造潜力分析表明,通过充分挖掘工艺潜能,能够保证出水稳定达标。针对工艺潜能挖掘,通过实施精确曝气控制系统优化、精确进水分配、优化内回流及强化化学/生物除磷能力等措施,能够保证出水稳定达到升级后的标准要求。提出的运行措施已部分应用于该污水处理厂日常运行,取得了良好的运行效果。下一步将结合该污水处理厂的提标改造进展,综合评估措施的实施效果,以期为同类污水处理厂的提标改造提供实践参考。

参考文献:

- [1] 李鹏峰,郑兴灿,李激,等. 城镇污水处理厂提标改造工作流程探讨[J]. 中国给水排水, 2019, 35(22): 14-19.
- LI Pengfeng, ZHENG Xingcan, LI Ji, *et al.* Discussion on workflow of upgrading and reconstruction in municipal WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(22): 14-19(in Chinese).
- [2] 董洋,汪德金,余波. 多级AO工艺用于全地下式北京碧水污水处理厂升级改造[J]. 中国给水排水, 2018,

34(2):59-62.

DONG Yang, WANG Dejin, YU Bo. Application of multi-stage AO process in the upgrading and reforming project in underground Beijing Bishui wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(2): 59-62(in Chinese).

- [3] 王舜和,李朦,郭淑琴. 张贵庄污水处理厂分段进水多级AO工艺的设计与运行[J]. 中国给水排水, 2018, 34(12):53-56.

WANG Shunhe, LI Meng, GUO Shuqin. Design and operation for the step-feed multi-stage AO process in Tianjin Zhangguizhuang wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(12): 53-56(in Chinese).

- [4] 姚学文,罗斌,邱家国,等. 混合液回流比和外碳源对反硝化脱氮效能的影响[J]. 中国给水排水, 2019, 35(9):58-62,66.

YAO Xuewen, LUO Bin, QIU Jianguo, *et al.* Effect of mixed liquor recycle ratio and external carbon source on denitrification efficiency [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(9): 58-62,66(in Chinese).

- [5] 贾建伟,党晓宏,李建洋,等. AMAO(多级AO)工艺在污水厂扩建工程中的应用及运行[J]. 中国给水排水, 2019, 35(4):63-66.

JIA Jianwei, DANG Xiaohong, LI Jianyang, *et al.* Application and operation of AMAO technology (multi-stage AO) for expansion project of wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(4): 63-66(in Chinese).

作者简介:周合喜(1989-),男,河南信阳人,博士,工程师,主要从事污水生物处理技术研究与应用工作。

E-mail:hexi725@163.com

收稿日期:2020-01-13

修回日期:2020-04-07

(编辑:丁彩娟)